

Мессерле В.Е.^{1,2}, Устименко А.Б.^{2*}, Славинская Н.А.³, Ситдииков Ж.Ж.²

¹Институт проблем горения, Казахстан, г. Алматы

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, г. Новосибирск,

²ТОО «Плазматехника R&D», Институт экспериментальной и теоретической физики,

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

³Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, Германия, г. Гарчинг,

*e-mail: ust@physics.kz

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Настоящая статья посвящена термодинамическому моделированию процесса плазменной переработки ОСХ. Термодинамический анализ процесса плазменной переработки отходов выполнен с использованием универсальной программы термодинамических расчетов TERRA. В работе под ОСХ подразумеваются экскременты сельскохозяйственных животных (навоз). Для исследований используется высушенный смешанный навоз (кизьяк влажностью 30%) от крупного рогатого скота. Термодинамические расчеты показали, что при плазменной газификации и пиролизе ОСХ производится высококалорийный горючий газ с выходом синтез-газа 65,2 и 68,5%, соответственно. При этом вредные компоненты не выявлены. Плазменный газификатор позволит эффективно перерабатывать различные типы ОСХ в высококалорийный энергетический газ, состоящий в основном из синтез-газа, и нейтральный шлак. Разработана технологическая схема процесса плазменной переработки ОСХ. На предложенной плазменной установке, реализующей эту схему, в зависимости от состава ОСХ, из 1 кг можно получить до 1,7 м³ сухого энергетического газа. При этом его калорийность будет изменяться от 8500 до 9300 МДж/м³. Состав энергетического газа составит, об.-%: H₂ – 35-39, CO – 29-31, CO₂ – 4-6, N₂ – 10-14, H₂O – 13-18. Такой газ может быть использован в качестве рабочего тела высокоэффективных электрогенераторов нового поколения, включая твердооксидные топливные элементы или в качестве исходного сырья для получения синтетических моторных топлив (метанол, диметилэфир).

Ключевые слова: отходы сельского хозяйства, плазменная переработка, газификация, пиролиз, синтез-газ, плазменный газификатор.

Messerle V.E.^{1,2}, Ustimenko A.B.^{2*}, Slavinskaya N.A.³, Sitdikov Zh.Zh.²

¹Combustion problems Institute, Kazakhstan, Almaty,

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Russia, Novosibirsk, Plasmatechnics R&D LLC,

²Institute of Experimental and Theoretical Physics Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty,

³Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, Germany, Garching,

*e-mail: ust@physics.kz

Thermodynamic analysis of plasma gasification of agricultural waste

This paper is devoted to the thermodynamic modelling of AW plasma-processing. The thermodynamic analysis of the waste plasma processing was performed using the universal program of thermodynamic calculations TERRA. In the work under the AW means the excrement of farm animals (manure). For research, dried mixed manure (dung with 30% moisture content) from cattle is used. Thermodynamic calculations showed that during plasma gasification and pyrolysis of AW, high-calorie combustible gas is produced with a synthesis gas yield of 65.2 and 68.5%, respectively. No harmful components were

detected. Plasma gasifier will allow to effectively process various types of AW into high calorific energy gas, consisting mainly of synthesis gas, and into neutral slag. The technological scheme of AW plasma processing has been developed. Using proposed plasma plant that implements this scheme, depending on the composition of the AW, up to 1.7 m³ of dry energy gas can be obtained from 1 kg of AW. At the same time, its caloric content will vary from 8500 to 300 MJ/Nm³. The composition of the energy gas will be following, vol. %: H₂ – 35-39, CO – 29-31, CO₂ – 4-6, N₂ – 10-14, H₂O – 13-18. Such gas can be used as a working medium of highly efficient electric generators of a new generation, including solid oxide fuel cells or as a raw material for the production of synthetic motor fuels (methanol, dimethylether)

Key words: agricultural waste, plasma processing, gasification, pyrolysis, synthesis gas, plasma gasifier.

Мессерле В.Е.^{1,2}, Устименко А.Б.^{2*}, Славинская Н.А.³, Ситдииков Ж.Ж.²

¹Жану мәселелері институты, Қазақстан, Алматы қ.

С.С. Кутутеладзе атындағы «Жылу физикасы институты», СБ РФА, Ресей, Новосибирск қ.

²ЖШС «Плазматехника R&D», Эксперименттік және теориялық физика ҒЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің, Қазақстан, Алматы қ.

³Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, Германия, Гарчинг қ.,

*e-mail: ust@physics.kz

Ауыл шаруашылық қалдықтарын плазмалық газдандырудың термодинамикалық анализі

Бұл мақала АШҚ плазмалық өңдеу процесін термодинамикалық модельдеуге арналған. Қалдықтарды плазмалық өңдеудің термодинамикалық анализі, TERRA термодинамикалық есептеуге арналған әмбебап бағдарламасы көмегімен орындалды. Жұмыс барысында АШҚ ретінде ауыл шаруашылық жануарларының экскременттері (көң) қарастырылды. Зерттеу барысында ірі қара малдың құрғақ, араласқан көңі (30% ылғалдылығы бар көң) қолданылды. Термодинамикалық есептеулер көрсеткендей, АШҚ-ын плазмада газдандыру және пиролиз кезінде, шығысында 65,2 және 68,5% синтез-газ беретін, жоғары калориялы жанғыш газ өндіріледі. Зерттеу барысында ешқандай қауіпті компоненттер анықталмады. Плазма газификаторы, синтез-газдан және бейтарап шлактан тұратын, АШҚ-дың әртүрлі типтерінен жоғары калориялы энергетикалық газ өндіруге мүмкіндік береді. АШҚ-ды плазмалық өңдеу процесінің блок-схемасы әзірленді. Ұсынылған плазмалық қондырғы негізінде, АШҚ құрамына байланысты, 1 кг қалдықтан 1,7 м³ дейін құрғақ энергетикалық газ алуға болады. Сонымен қатар, оның калория мөлшері 8500 ден 9300 МДж/нм³-ге дейін өзгереді. Энергетикалық газ құрамы, пайызбен болады %: H₂ – 35-39, CO – 29-31, CO₂ – 4-6, N₂ – 10-14, H₂O – 13-18. Мұндай газ, жаңа синтетикалық мотор отындарын (метанол, диметилметр) өндіру үшін шикізат ретінде және қатты оксидті отын элементтерін қоса қарастырғанда, жаңа буынның жоғары тиімді электр генераторларының жұмыс отыны ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: ауыл шаруашылық қалдықтары, плазмалық өңдеу, газдандыру, пиролиз, синтез-газ, плазма газификаторы.

Введение

Интенсивное индустриальное развитие повышает потребности в энергоресурсах, которые на сегодняшний день в мире составляют 12–15 млрд.т. условного топлива [1-3]. Энергопотребление покрывается за счет использования следующих источников энергии: угля, нефти, газа, атомной энергии и возобновляемых источников энергии. Несмотря на постоянный рост потребления топлив, осуществляется системный поиск альтернативных источников энергии (энергия солнца, ветра, приливов, отливов и отходов). Бытовые, промышленные и сельскохозяйственные отходы являются основным альтернативным энергоносителем. Поиск альтернативных энергоносителей является актуальной мировой

проблемой [4]. С одной стороны, это связано с большими затратами на производство традиционных энергоносителей и истощением их месторождений, а с другой стороны с резким ухудшением экологической обстановки в мире. В ряде случаев в связи с постоянным ростом цен на нефть, газ и уголь, получение альтернативного топлива из углеродсодержащих отходов (твердые бытовые отходы, медико-биологические отходы, растительная масса, продукты жизнедеятельности животных) становится все более актуальным и рентабельным. Актуальность этого направления подтверждается выходов в свет справочника по термическому обезвреживанию отходов [5].

Более пятидесяти лет ведется интенсивное изучение возможностей производства топлива

из биомассы, включая ее пиролиз и газификацию [6-10]. Уже сейчас некоторые виды промышленности используют биомассу в качестве источника энергии. В агропромышленном комплексе после обработки и подготовки продуктов к реализации остается большое количество отходов. Значительную часть этих отходов дают птицефабрики и животноводческие предприятия, в основном в виде птичьего помета и навоза. При небольшом количестве эти отходы могут даже положительно влиять на окружающую среду. Но огромное их количество и нерациональное использование может иметь и отрицательные последствия для экологии [11-13]. Для предотвращения этого негативного влияния необходимо утилизировать отходы сельского хозяйства, например в виде топливного газа.

Из нетрадиционных источников энергоресурсов биогаз вызывает значительный интерес во всем мире. В основе технологий по его производству лежат сложные природные процессы биологического разложения органических веществ в анаэробных условиях под воздействием бактерий. Биогаз является альтернативным энергетическим топливом. Он состоит из метана (до 50-87%) и диоксида углерода (13-50%). Продукты сгорания биогаза можно использовать в качестве рабочего тела в парогазовой установке для выработки электрической и тепловой энергии. Однако процесс получения биогаза весьма длительный (до 12 суток), а установки для получения биогаза из отходов животноводства характеризуются низкой производительностью (до 100 м³ на одну тонну отходов) [6-8, 14]. Несмотря на сложный технологический цикл получения биогаза из отходов животноводства малые биогазовые установки активно создаются в мире. Так, больше всех биогазовых установок создано в Китае (около 40 млн.) с общей производительностью более 7 млрд. куб. метров биогаза в год.

Потенциал биогазовой индустрии Германии оценивается в 100 млрд. кВтч электроэнергии к 2030 году, что будет составлять около 10% от потребляемой страной энергии. Стоимость биогаза составляет 0,4-0,5 Евро за 1 литр в бензиновом эквиваленте.

Плазмохимическая переработка отходов агропромышленного комплекса позволяет интенсифицировать процесс получения топливного газа, состоящего в основном из синтез-газа (CO+H₂), и резко повысить производительность установки (в 150-200 раз по сравнению с биогазовыми установками) [15-19]. Это достигается за счет высокой температуры в плазменном газификаторе и многократного снижения времени переработки отходов. Получаемый в результате плазмохимической переработки отходов синтез-газ может быть использован в качестве рабочего тела высокоэффективных электрогенераторов нового поколения, включая твердооксидные топливные элементы [20, 21] или в качестве исходного сырья для получения синтетических моторных топлив (метанол, диметилэфир).

Основным элементом плазменного газификатора для переработки отходов сельского хозяйства (ОСХ) является электродуговой плазмотрон, генерирующий термическую воздушную плазму с температурой до 5000 К [22, 23]. При этой температуре полностью разлагаются любые сложные органические и неорганические соединения до атомов и ионов. Главная отличительная особенность плазменной газификации ОСХ заключается в значительной интенсификации процесса деструкции отходов, который протекает за весьма короткий промежуток времени (0,1-0,3 с). Другая существенная особенность плазменной технологии переработки и уничтожения отходов заключается в отсутствии каких-либо высокомолекулярных токсичных соединений в продуктах термохимических превращений.

Таблица 1 – Химический состав ОСХ, масс. %

ОСХ	H ₂ O	Органическое вещество	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Навоз	71,4	26,75	0,5	0,25	0,6	0,35	0,15
Кизяк	30,0	65,47	1,22	0,61	1,47	0,86	0,37

В настоящей работе под ОСХ подразумеваются экскременты сельскохозяйственных животных (навоз). Для исследований используется высушенный смешанный навоз (кизьяк влажностью 30%) от крупного рогатого скота, лошадей, овец, коз и свиней. Средний состав (ОСХ) представлен в таблице 1 [24, 25]. Органическое вещество навоза представляет собой в основном целлюлозу ($(C_6H_{10}O_5)_n$) с небольшим содержанием органической серы.

Ниже представлены результаты термодинамического анализа процесса плазмохимической переработки ОСХ и технологическая схема процесса на базе плазменной установки для пиролиза и газификации ОСХ.

Термодинамический анализ

Для термодинамического анализа процесса газификации ОСХ использовалась универсальная программа термодинамических расчетов TERRA. Она была создана для расчетов высокотемпературных процессов и, в отличие от традиционных термодинамических методов расчета равновесия, которые используют энергию Гиббса, константы равновесия и закон действующей массы Гульдберга и Вааге, программа TERRA основана на принципе максимизации энтропии для изолированных термодинамических систем, находящихся в равновесии. Программа TERRA имеет собственную базу данных по термодинамическим свойствам для 3000 химических веществ в температурном диапазоне от 300 до 6000 К [26].

В расчетах использовался следующий состав ОСХ (кизьяка), масс. %: $H_2O - 30$, $C - 29,07$, $H - 4,06$, $O - 32,08$, $S - 0,26$, $N - 1,22$, $P_2O_5 - 0,61$, $K_2O - 1,47$, $CaO - 0,86$, $MgO - 0,37$. Выполнены расчеты плазменной газификации и плазменного пиролиза кизьяка в интервале температур 300–3000 К и давлении 1 атм. Расчеты проведены для следующих термодинамических систем, массовые доли: 1 ОСХ + 0,25 воздуха (плазменная газификация) и 1 ОСХ + 0,25 азота (плазменный пиролиз).

Результаты расчетов состава газовой и конденсированной фаз, степень газификации углерода и удельные энергозатраты процессов плазменной переработки ОСХ представлены на рисунках 1-6.

Одним из критериев эффективности процесса переработки ОСХ является достижение сте-

пени полной газификации содержащегося в отходах углерода. Степень газификации углерода рассчитывается по формуле:

$$X_c = \frac{C_{нач} - C_{кон}}{C_{нач}} \cdot 100\%,$$

где $C_{нач}$ и $C_{кон}$ исходные и конечные концентрации углерода в ОСХ и твердом остатке соответственно.

На рисунке 1 представлены степени газификации ОСХ при их воздушной газификации (кривая 1) и пиролизе (кривая 2). Из рисунка следует, что степень газификации возрастает с ростом температуры в обоих случаях, но при газификации несколько быстрее, чем при пиролизе. Тем не менее, при температуре $T=950$ К степень газификации достигает 100% для обоих процессов.

Составы газовой фазы продуктов плазменной газификации и пиролиза качественно подобны (рисунки 2 и 3). При оптимальной температуре 1500 К, обеспечивающей как полную газификацию углерода ОСХ (рисунок 1), так и разложение токсичных соединений фурана, диоксина и бенз(а)пирена, получен следующий состав горючего газа, об. %: $CO - 29,6$, $H_2 - 35,6$, $CO_2 - 5,7$, $N_2 - 10,6$, $H_2O - 17,9$ (воздушно-плазменная газификация – рисунок 2) и $CO - 30,2$, $H_2 - 38,3$, $CO_2 - 4,1$, $N_2 - 13,3$, $H_2O - 13,6$ (плазменный пиролиз – рисунок 3). Из рисунков 2 и 3 следует, что при оптимальной температуре 1500 К обеспечивается максимальный выход горючих компонентов достигает при газификации 99,4% и при пиролизе 99,5%. При этом выход побочных продуктов не превышает 0,6 и 0,5%, соответственно, для плазменной газификации и пиролиза ОСХ.

На рисунках 4 и 5 показано изменение состава конденсированной фазы в зависимости от температуры процессов газификации и пиролиза соответственно. Из сравнения рисунков видно, что кривые концентраций конденсированных компонентов качественно и количественно подобны. При этом углерод в обоих случаях переходит в газовую фазу в виде CO при температуре 950 К. При оптимальной температуре 1500 К в конденсированной фазе остаются наиболее устойчивые соединения, трикальцийфосфат ($Ca_3P_2O_8$), оксид магния (MgO) и сульфид кальция (CaS), безопасные для окружающей среды.

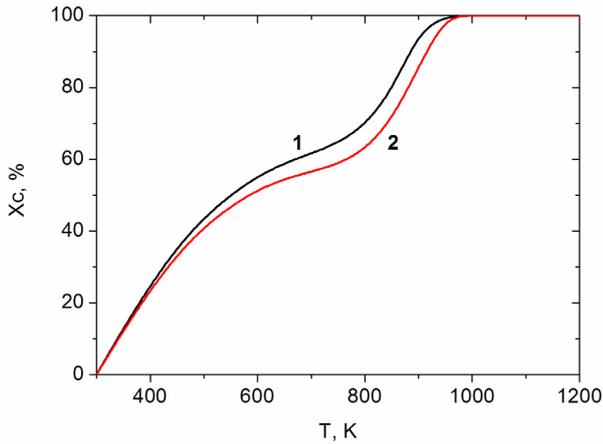


Рисунок 1 – Зависимость степени газификации ОСХ от температуры воздушной газификации (1) и пиролиза (2)

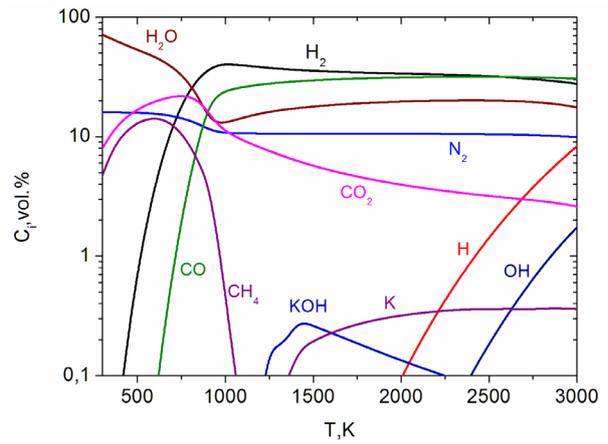


Рисунок 2 – Зависимость состава газовой фазы от температуры процесса плазменной газификации ОСХ

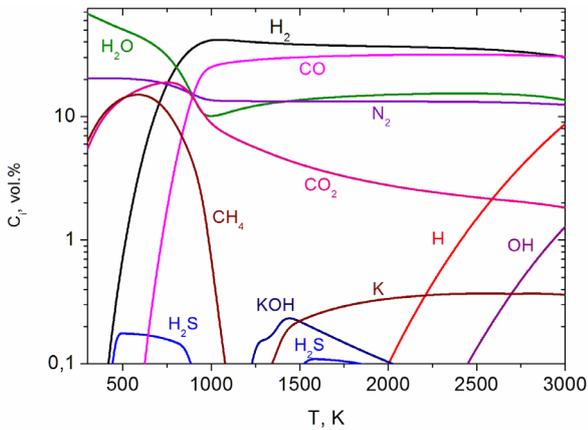


Рисунок 3 – Зависимость состава газовой фазы от температуры процесса плазменного пиролиза ОСХ

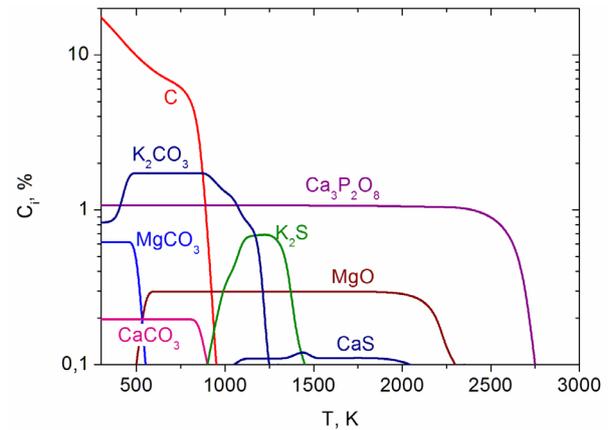


Рисунок 4 – Зависимость состава конденсированной фазы от температуры процесса плазменной газификации ОСХ

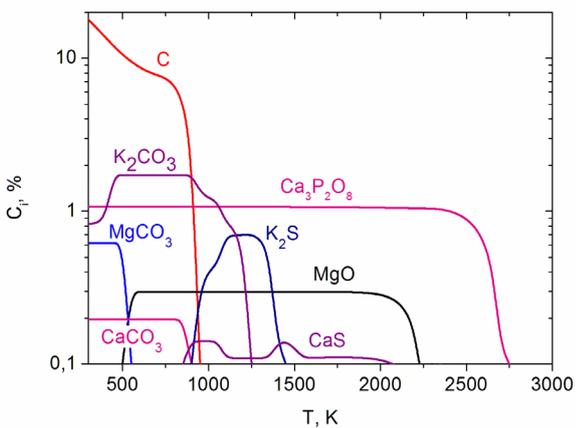


Рисунок 5 – Зависимость состава конденсированной фазы от температуры процесса плазменного пиролиза ОСХ

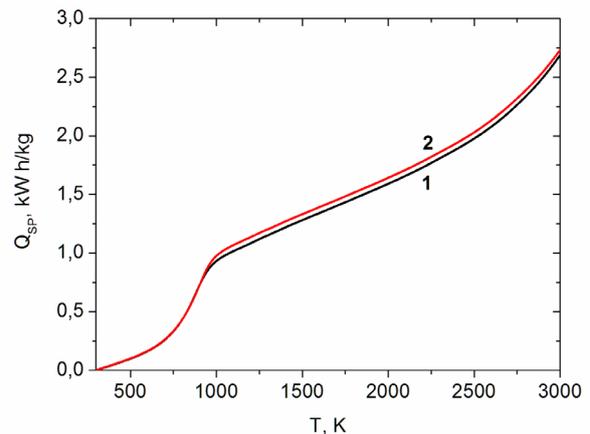


Рисунок 6 – Удельные энергозатраты на газификацию (1) и пиролиз (2) ОСХ в зависимости от температуры процесса

На рисунке 6 приведена зависимость от температуры приведенных к одному килограмму рабочего тела удельных энергозатрат на процесс газификации (кривая 1) и пиролиза (кривая 2) ОСХ. Видно, что кривые качественно подобны. При этом удельные энергозатраты при температуре 1500 К составляют 1,28 и 1,33 кВтч/кг, соответственно для газификации и пиролиза ОСХ. Большие энергозатраты при пиролизе объясняются меньшим тепловыделением от реакций окисления углерода и водорода из-за меньшего массового отношения окислитель: ОСХ в процессе пиролиза.

Расчеты показали, что при плазменной газификации и пиролизе ОСХ производится высококалорийный горючий газ с выходом синтез-газа ($\text{CO} + \text{H}_2$) 65,2 и 68,5%, соответственно. При этом вредные компоненты не выявлены.

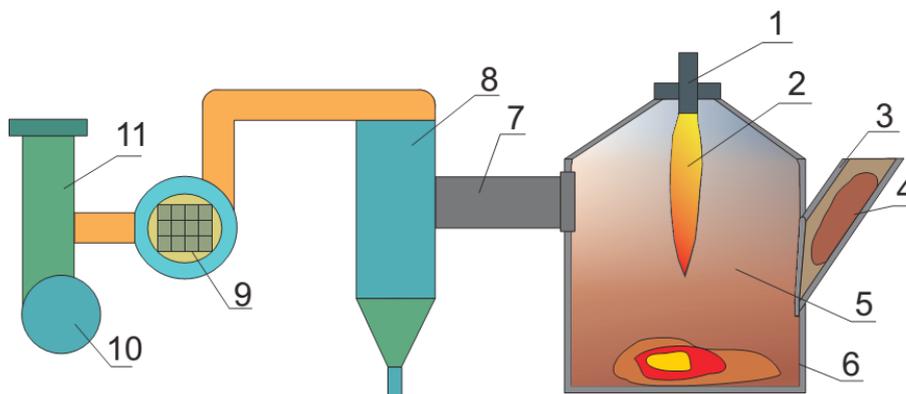
Технологическая схема процесса

В основе технологической схемы плазмохимического процесса переработки ОСХ выбрана плазменная технология газификации отходов, которая позволяет получать высококалорийный синтез-газ с выходом до 70 % и теплотой сгорания до 10 МДж/м³. Использование синтез-газа в качестве топлива в энергетических котлах, газотурбинных установках (ГТУ) и в электрогенераторах нового поколения на основе твердооксидных топливных элементов позволяет

вырабатывать тепловую и/или электрическую энергию с КПД, превышающим таковой для существующих ТЭС [20].

Меньшее по сравнению с процессом сжигания количество окислителя и высокие температуры в реакционной зоне плазменного реактора (1500-1900 К) блокируют образование канцерогенных веществ (диоксин, фураны, бенз(а)пирен) и обеспечивают получение нейтрального шлака с инертными свойствами, позволяющими использовать его в строительной и автомобильной отраслях промышленности. Результаты расчетов позволяют предложить технологическую схему плазмохимической переработки ОСХ.

На рисунке 7 приведена схема установки для осуществления технологической схемы плазмохимической переработки ОСХ. В состав установки, кроме плазменного реактора 6 с высокоресурсным электродуговым плазмотроном 1 [22], входят системы электроснабжения и управления плазмотроном, а также системы газо- и водоснабжения реактора с плазмотроном и очистки отходящих газов 9. Установка снабжена системой отбора газообразных и конденсированных продуктов плазменной переработки ОСХ для проведения их анализа. Плазменный реактор 6 предназначен для плазменной газификации и пиролиза ОСХ различного происхождения. В стенке реактора 6 предусмотрен смотровой лючок для измерения температуры пирометром в объеме реактора.



- 1 – электродуговой плазмотрон, 2 – плазменный факел, 3 – патрубок для подачи брикетированных ОСХ, 4 – брикеты ОСХ, 5 – зона газификации (пиролиза) ОСХ, 6 – плазменный реактор, 7 – камера для удаления отходящих газов из реактора, 8 – циклонная камера сгорания, 9 – блок газоочистки с рукавным фильтром, 10 – двигатель вытяжного вентилятора, 11 – система вытяжной вентиляции.

Рисунок 7 – Схема плазменной установки для переработки ОСХ

Процессы плазменной газификации и пиролиза ОСХ осуществляются следующим образом. После включения плазмотрона 1 и прогрева реактора 6 до температуры внутренней поверхности футеровки, равной 1100 К, измеряемой через патрубков 3 в зону газификации 5 подаются брикетированные ОСХ 4. ОСХ газифицируются в воздушном (или азотном при пиролизе) плазменном факеле 2, обеспечивающем среднemasсовую температуру в объеме реактора до 1900 К. Образующиеся газообразные продукты выводятся из реактора через камеру вывода отходящих газов 7 в циклонную камеру сгорания 8, после чего продукты сгорания поступают в блок газоочистки с рукавным фильтром 9, после которого выводятся системой вытяжной вентиляции 10 и 11, обеспечивающей разрежение в реакторе до 10 мм водяного столба. Конденсированные продукты скапливаются в зоне шлакообразования на дне реактора 6. Совмещение зон тепловыделения от плазменного факела 2, газификации (пиролиза) ОСХ 5 и шлакообразования способствует интенсификации процесса переработки ОСХ.

Технологическая схема процесса плазменной переработки ОСХ характеризуется следующими параметрами плазменной установки:

Производительность по ОСХ – до 60 кг/ч.

Мощность плазмотрона регулируется в интервале 30-100 кВт.

Расход получаемого энергетического газа – 50-100 м³/ч.

Температура отходящих газов составляет 1400 – 1700 К.

Для работы плазмотрона требуется источник электропитания, трехфазный трансформатор, воздушный компрессор, водяной насос.

В зависимости от состава ОСХ из 1 кг можно получить до 1,7 м³ сухого энергетического газа. При этом его калорийность будет изменяться от 8500 до 9300 МДж/м³. Состав энергетического газа, об. %: Н₂ – 35-39, СО – 29-31, СО₂ – 4-6, N₂ – 10-14, Н₂О – 13-18.

Плазменная установка является устройством периодического действия для нагрева кусковых или пакетированных материалов плазменным факелом до температуры газификации (пиролиза) органической составляющей перерабатываемых ОСХ и плавления зольного остатка обрабатываемого сырья.

Заключение

Выполнен термодинамический анализ процесса плазмохимической переработки отходов сельского хозяйства с использованием универсальной программы термодинамических расчетов TERRA.

Разработана техническая схема процесса плазменной переработки отходов сельского хозяйства. На предложенной плазменной установке, реализующей эту схему, в зависимости от состава ОСХ, из 1 кг можно получить до 1,7 м³ сухого энергетического газа. При этом его калорийность будет изменяться от 8500 до 9300 МДж/м³. Состав энергетического газа: Н₂ – 35-39 об. %, СО – 29-31%, СО₂ – 4-6%, N₂ – 10-14%, Н₂О – 13-18%.

Расчеты показали, что при плазменной газификации и пиролизе ОСХ производится высококалорийный горючий газ с выходом синтез-газа (СО+Н₂) 65,2 и 68,5%, соответственно. При этом вредные компоненты не выявлены. Плазменный газификатор позволит эффективно перерабатывать различные типы ОСХ в высококалорийный энергетический газ, состоящий в основном из синтез-газа, и нейтральный шлак.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан по программам целевого финансирования и проектам грантового финансирования (BR05236507, BR05236498, AP05130731 и AP05130031).

Литература

- 1 Прохоров А. В., Копылов С. И., Копылов В. В., Сычев Е. А. Получение топлива из отходов: состояние и перспективы / Научно-методический электронный журнал «Концепт» – 2017. – Т. 39. – С. 1751–1755.
- 2 BP Statistical Review of World Energy 2017: BP p.l.c., June 2017. 66th edition – P. 50 https://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_ch/PDF/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf 25.02.2019
- 3 Key World Energy Statistics: International Energy Agency. OECD/IEA, 2017. P. 95. – <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf> 25.02.2019
- 4 Родионов В. Г. Энергетика : проблемы настоящего и возможности будущего.– М.: ЭНАС, 2010. – 352 с.
- 5 Обезвреживание отходов термическим способом (Сжигание отходов) / Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям, ИТС 9-2015. – М: бюро НТД, 2015. – 249 с.

- 6 Baader W., Dohne E., Brenndörfer M. Biogas in Theorie und Praxis. / Behandlung organischer Reststoffe aus der Landwirtschaft durch Methangärung. – Frankfurt: KTBL-Schrift 229, 1978. – P. 134
- 7 Biogas Opportunities Roadmap. U.S. Department of Agriculture, U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Department of Energy, August 2014. – P. 28 http://www.usda.gov/oce/reports/energy/Biogas_Opportunities_Roadmap_8-1-14.pdf 25.02.2019
- 8 Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). Биогаз на основе возобновляемого сырья. – Германия: Издание 1, 2010. – 115 с.
- 9 Cerone N., Zimbardi F. Gasification of Agroresidues for Syngas Production // *Energies*. – 2018. – V. 11. – P. 1280-1298
- 10 Jahirul M.I., Rasul M.G., Chowdhury A.A., Ashwath N. Biofuels Production through Biomass Pyrolysis —A Technological Review // *Energies*. – 2012. – V.5. – P. 4952-5001.
- 11 Багрянцев Г.И., Черников В.Е. Термическое обезвреживание и переработка промышленных и бытовых отходов // Муниципальные и промышленные отходы: способы обезвреживания и вторичной переработки, Аналит. обзор. – Новосибирск, 1995. – 156 с.
- 12 Бельков В.М. Методы, технологии и концепция утилизации углеродсодержащих промышленных и твердых бытовых отходов // *Химическая промышленность*. – 2000. – №11. – С. 8-25.
- 13 Лотош В.Е. Классификация утилизационных технологий переработки отходов. // *Экологические системы и приборы*. – 2003. – №2. – С.29-31.
- 14 Лотош В.Е. Переработка отходов природопользования. – Екатеринбург: Полиграфист, 2007. – 503 с.
- 15 Мессерле В.Е., Моссэ А.Л., Никончук А.Н., Токмолдин С.Ж., Устименко А.Б. Переработка медико-биологических отходов в камерной печи с плазмотроном постоянного тока. // *Вестник КазНУ. Серия физическая*. – 2015. – Т. 53, № 2. – С. 27-34.
- 16 С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин. Системные принципы в решении задач экологической безопасности с применением электроплазменных технологий / Ред. кол.: А. М. Гонопольский, В. Н. Коротаев, Е. И. Пупырев // Сборник докладов конференции Международной ассоциации по твердым отходам (ISWA) «Твердые бытовые отходы: системы управления и технические решения», Москва, 28-29.05.2013. М.: Фирма СИБИ. – 2013. – С. 4-9
- 17 Каренгин А.Г. Плазменные процессы и технологии. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 144 с.
- 18 Messerle V.E., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A. Comparative study of coal plasma gasification: Simulation and experiment // *Fuel*. – 2016. – V. 164 – P.172-179.
- 19 Pang Y., Bahr L., Fendt P., Zigan L., Will S., Hammer T., Baldauf M., Fleck R., Müller D., Karl J. Plasma-Assisted Biomass Gasification with Focus on Carbon Conversion and Reaction Kinetics Compared to Thermal Gasification // *Energies*. – 2018. – V. 11. – P.1302-1326.
- 20 Galvita V., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Hydrogen production by coal plasma gasification for fuel cell technology. *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2007. – V. 32, N.16. – P.3899-3906.
- 21 Katsaros G., Nguyen T.-V., Rokni M. Tri-generation System based on Municipal Waste Gasification, Fuel Cell and an Absorption Chiller // *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. – 2018. – V. 6, N. 1. – P. 13-32.
- 22 Гольш В.И., Карпенко Е.И., Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Ушанов В.Ж. Высокотемпературный электродуговой плазмотрон // *Химия высоких энергий*. – 2009. – Т. 43, № 4. – С. 371-376.
- 23 Messerle V.E., Mosse A.L., Ustimenko A.B. Processing of biomedical waste in plasma gasifier // *Waste Management*. – 2018. – V. 79. – P.791-799.
- 24 Справочник органических удобрений. – <http://навзоразбрасыватели.рф/>
- 25 Васильев В.А., Филиппова Н.В. Справочник по органическим удобрениям. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 255 с.
- 26 Gorokhovskii M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov B.G., Ustimenko A.B. Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory // *Journal of the Energy Institute*. – 2005. – Vol. 78, N.4. – P.157-171.

References

- 1 A.V. Prohorov, S.I. Kopylov, V.V. Kopylov and E.A. Sychev, *Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal «Kontsept»*, 39, 1751–1755 (2017) (in Russ)
- 2 BP Statistical Review of World Energy 2017, 66, 50 (2017).
- 3 Key World Energy Statistics 2017: International Energy Agency. OECD/IEA, 95 (2017)
- 4 V.G. Rodionov, *Energetika: problemy nastoyashchego i vozmozhnosti budushchego*, (Moscow: EHNAS 2010) 352 p. (in Russ)
- 5 Obezvrezhivanie othodov termicheskim sposobom (Szhiganie othodov), *Informacionno-tekhnicheskij spravochnik po naitchshim dostupnym tekhnologiyam*, (ITS 9-2015, Moscow: NTD, 2015) 249 p. (in Russ)
- 6 W. Baader, E. Dohne and M. Brenndörfer, *Biogas in Theorie und Praxis*, (Frankfurt: KTBL-Schrift 229, 1978), 134 p.
- 7 USDA, U.S. EPA, U.S. DOE, *Biogas Opportunities Roadmap*, (August 2014), 28 p.
- 8 Special'noe agentstvo obnovlyaemyh resursov (FNR). Biogaz na osnove obnovlyaemogo syr'ya. – (Germaniya: Izdanie 1, 2010), 115 p. (in Russ)
- 9 N. Cerone and F. Zimbardi, *Energies*, 11, 1280-1298.(2018).
- 10 M.I. Jahirul, M.G. Rasul, A.A. Chowdhury and N. Ashwath, *Energies*, 5, 4952-5001 (2012).

- 11 G.I. Bagryancev and V.E. Chernikov, Termicheskoe obezvrezhivanie i pererabotka promyshlennyh i bytovyh othodov, Municipal'nye i promyshlennye othody: sposoby obezvrezhivaniya i vtorichnoj pererabotki: Analit. obzor (Novosibirsk, 1995) 156 p. (in Russ)
- 12 V.M. Bel'kov, Himicheskaya promyshlennost', 8-25 (2000) (in Russ)
- 13 V.E. Lotosh, Ekhkologicheskie sistemy i pribory, 2, 29-31 (2003) (in Russ)
- 14 V.E. Lotosh, Pererabotka othodov prirodopol'zovaniya, (Ekaterinburg: POLIGRAFIST, 2007) 503 p. (in Russ)
- 15 V.E. Messerle, A.L. Mosse, A.N. Nikonchuk, S.Zh. Tokmoldin and A.B. Ustimenko, Rec. Contr to Phys. 53, 27-34 (2015) (in Russ)
- 16 S.V. Anahov and Yu.A. Pykin, Sistemnye principy v reshenii zadach ehkologicheskoy bezopasnosti s primeneniem ehlektro-plazmennyyh tekhnologij Conf. ISWA (Moscow, 28-29 May, 2013), p. 4-9 (in Russ)
- 17 A.G. Karengin, Plazmennyye processy i tekhnologii., (Tomsk: Izdatel'stvo TPU, 2009), 144 p. (in Russ)
- 18 V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, and O.A. Lavrichshev, Fuel, 164, 172-179 (2016).
- 19 Y. Pang, L. Bahr, et al, Energies, 11, 1302-1326 (2018).
- 20 Galvita V., Messerle V.E., et al, Intern. J of Hydrogen Energy, 32, 3899-3906 (2007).
- 21 Katsaros G., Nguyen T.-V. and Rokni M., J of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 6, 13-32 (2018).
- 22 V.I. Golish, E.I. Karpenko et al, High Energy Chemistry, 43, 318–323 (2009)
- 23 V.E. Messerle, A.L. Mosse, A.B. Ustimenko, Waste Management, 79, 791–799 (2018).
- 24 Spravochnik organicheskikh udobrenij. <http://навозоразбрасыватели.рф> (in Russ)
- 25 V.A., Vasil'ev and N.V. Filippova Spravochnik po organicheskim udobreniyam., (izdanie 2-e . pererab. i dop., M.: Rosagro-promizdat, 1988), 255 p. (in Russ)
- 26 M. Gorokhovski, E.I. Karpenko, et al, J of the Energy Institute, 78, 157-171 (2005).